

Válasz Kriza György bírálatára

Szeretném megköszönni opponensemnek a dolgozat gondos áttanulmányozását, az értekezéshez fűzött elismerő megjegyzéseit és kritikus észrevételeit.

Kérdéseire az alábbiakat válaszolom:

1. *"A 3. fejezetben a grafén nagyáramú elektromos transzportját vizsgálja és megállapítja, hogy különböző elektromostér-tartományokban eltérő viselkedés figyelhető meg. Megvizsgálja különösen, hogy a relativisztikus kvantum-mechanikából több mint 60 éve ismert, de kísérletileg sohasem igazolt Schwinger-mechanizmus (grafénban elektron-lyuk párok keltése alagutazással) hogyan befolyásolja az áram elektromostér-függését. Eredményeit összeveti Vandecasteele és munkatársai [Phys. Rev. B 82, 045416 (2010)] kísérleti eredményeivel. Ezek a szerzők bizonyos mintákon valóban szuperlineáris, 1-nél nagyobb kitevőjű hatványfüggvény szerinti áram-feszültség karakterisztikát mértek, hasonlóan eredményeihez. A kitevő értéke azonban a kísérletekben 1 és 1,4 között változik, ami egyrészt nem egyezik a számításaiból kapott 3/2 exponenssel, másrészt nem is univerzális érték, mintáról mintára változik. A fentiek tükrében túlzónak tűnik az 1. tézispont azon állítása, hogy elméleti eredményeit később kísérletileg igazolták. Milyen kísérletben lehetne meggyőzően kimutatni a Schwinger- mechanizmus szerepét a transzport-folyamatokban?"*

Egy szilárdtestfizikai rendszerben ennél jobban valószínűleg sehogy, hiszen a nemlineáris tartományban a Drude-elmélet keretében az áram a $j \sim E^{3/2}\tau$ viselkedést követi, ahol E az elektromos tér, τ pedig a fenomenológikus relaxációs idő. Nemegyensúlyi körülmények között ez is függhet magától az elektromos tértől (hiszen a lineáris válasz tartományán már régen túl vagyunk) és az elektron-elektron, -rács vagy -szennyező kölcsönhatástól, ily módon maga a 3/2-es exponens is megváltozhat a relaxációs idő viselkedése miatt.

Hideg atomi rendszerekben viszont jó esély nyílik rá, hogy a L. Tarruell et al., Nature 483, 302 (2012) cikk technikáját követve megfigyelhető legyen a kialakuló áram, vagy a keltett elektron-lyuk párok száma, hiszen ilyen rendszerekben a különböző relaxációs folyamatok jól kontrollálhatóak. Azonban a rács véges mérete, a csapdázó potenciál jelenléte és a véges hőmérséklet újabb problémákat vethet fel, de remélhetőleg ezeken könnyebb úrrá lenni, mint a szilárdtestfizikai kísérletekben jelen lévő nehézségeken.

2. *”A fent említett párkeltési tartományban az elektromos tér bekapcsolásának hatását az egzaktul megoldható Landau-Zener-modellben írja le: kiszámolja, hogy a bekapcsolás után adott idővel mennyire ürül ki egy negatív energiájú elektronállapot, illetve mennyire töltődik be ennek az állapotnak az azonos hullámszám-vektorú pozitív energiájú párja. A nagy elektromos tér azonban sérti a rács diszkrét translációs szimmetriáját, így felmerül a kérdés, hogy a jelölt által használt, csak két állapotot figyelembe vevő számítás mennyire helyesen írja le a tényleges gerjesztési folyamatot. Vajon nem gerjesztődnek más hullámszám-vektorú állapotok is? Milyen elektromos térben és milyen mértékben befolyásolhatja ez a jelenség az eredményeit?”*

Egy homogén elektromos tér bekapcsolását figyelembe lehet venni egy skalárpotenciállal $V(x, t) \sim Ex\Theta(t)$, mely sérti a translációs szimmetriát, vagy teljesen ekvivalens módon egy időfüggő vektorpotenciállal $A(t) \sim Et\Theta(t)$, melynek figyelembevételkor az impulzus továbbra is jó kvantumszám marad. Ez a két leírás a Schrödinger egyenletben összekapcsolható egy unitér transzformációval, és alapvetően a bázisválasztás különbözteti meg őket. A skalárpotenciál bekapcsolása jóval bonyolultabbá tenné a számolásokat, de azonos eredményre vezetne a vektorpotenciális képben kapott kifejezésekkel. Az időfüggetlen skalárpotenciál esetét grafénra vizsgálták a V. V. Cheianov et al., Phys. Rev. B 74, 041403 (2006)-ben, amit szintén a Landau-Zener modellre lehet leképezni, és hasonló eredményre vezet.

3. *”Grafénban (és hasonlóképp a kétrétegű grafénban) a plazmonok energiája nullához tart a nulla hullámszámú határesetben. Milyen körülmények között befolyásolhatják ezek a kisenergiás kollektív gerjesztések a transzporttulajdonságokat?”*

A plazmonokat grafénban a B. Wunsch et al., New J. Phys. 8, 318 (2006)-ben vizsgálták, és kialakulásukért a Coulomb-kölcsönhatás felelős. Ily módon átfogalmazhatom a kérdést: mi a hatása a hosszútávú Coulomb kölcsönhatásnak a transzporttulajdonságokra? A Dirac-pont közelében a Fermi-sebesség logaritmikusan renormálódik E. G. Mishchenko, Phys. Rev. Lett. 98, 216801 (2007) alapján, vagyis $v(k) \sim 1 + a \ln(D/k)$, ahol D a levágás, és a Dirac-pontot közelítve divergál (a relativisztikus effektusokat elhanyagolva). Ezt kísérletileg is kimutatták D. C. Elias et al., Nat. Phys. 7, 701 (2011)-ben ciklotron tömegméréssel. A Dirac-ponttól távolodva ez az effektus elhanyagolható és a dc vezetőképességet nem befolyásolja. A nem-kölcsönható optikai vezetőképességet jelentősen megváltoztatja a Coulomb-kölcsönhatás, ahogy azt B. Rosenstein et al., Phys. Rev. Lett. 110, 066602

(2013)-ban megmutatták, és elméletileg 20%-kal is megváltozhat az értéke a nem-kölcsönható esethez képest. Ennek azonban kísérletileg semmi jelét nem látják, a mért optikai válasz tökéletesen értelmezhető a kölcsönhatás figyelembevétele nélkül is, mely jelenség előtt a legképzettebb elméleti kollégák is tanácstalanul állnak.

4. *”A kísérletileg mért kvantált Hall-effektus elromlásában nem csak a nemdiagonális vezetőképesség nagyterű változásának, hanem a véges diagonális vezetőképesség megjelenésének is szerepe van. Meg tudja-e határozni számításaiból a kísérletekben mért Hall-ellenállás áramfüggését? Mennyire egyezik a kvantált Hall-effektus kísérletileg megfigyelt elromlása az elméleti várakozásaival?”*

Számolásaim alapján a vezetőképesség véges elektromos térben $\sigma_{xx} \sim E^{1/2}\tau$ és $\sigma_{xy} \sim E^{-1/2}$. Ez alapján a Hall-ellenállás a $\rho_{xy} \sim \sigma_{xy}/\sigma_{xx}^2 \sim E^{3/2}/j^2$ alakot ölti nagy elektromos terek esetén. A kísérletileg rendelkezésre álló adatok alapján nehéz eldönteni, hogy ez a kifejezés összhangban van-e a kísérleti eredményekkel. Az összevetést nehezíti, hogy számolásaim nem véges mágneses tér esetére vonatkoznak, hanem csak egyetlen kvantum-Hall lépcsőt írnak le sikeresen. Mindenesetre az általam kapott kritikus elektromos tér értéke összeegyeztethető a Landau-kvantált grafénen számolt elméleti eredményekkel.

5. *”A 68. oldalon megjegyzi, hogy intuícója szerint az általa leírt Rabi-oszcillációk és a Zitterbewegung egylényegű jelenségek. Hogyan lehetne alátámasztani ezt a felvetést?”*

Konkrét kísérletet nem tudok javasolni ennek eldöntésére, megállapításom azon az elméleti észrevételen alapul, hogy a Rabi-oszcillációk és a Zitterbewegung hátterében egyaránt két eltérő energiájú nívó közötti csatolás áll. Ahogy azt dolgozatomban megmutattam, a Landau-kvantált grafén Hamilton-operátora leképezhető a kvantum optikai Jaynes-Cummings-modellre. Míg a grafén esetén a pozitív és negatív energiájú állapotok közti csatolás hozza létre a Zitterbewegung-ot, addig a leképezés után a Jaynes-Cummings-modellben ugyanezen két állapot közti optikai átmenetek okozzák a Rabi-oszcillációkat. Ily módon e két jelenség természetesen kapcsolódik össze és azonos alapokon nyugszik.

6. *”A Floquet-féle topologikus szigetelők vizsgálata kapcsán felmerült bennem a kérdés, hogy lehetne-e általános szimmetria-megfontolások alapján tárgyalni az erős elektromágneses terek hatását az elektronrendszer topologikus jellemzőire?”*

Egy rendszer topológiája két összetevőből áll: a spektrumnak topologikusnak kell lenni, valamint az állapotok betöltésének is megfelelőnek kell lennie. Pl. hiába van egy véges Chern-számmal rendelkező sávom, ha az nincs teljesen betöltve, a kialakuló állapot általában nem lesz topológiailag védett. Ilyen módon erős elektromos terek esetén legfeljebb a spektrum topologikus voltára lehetne esetleg következtetni, de a betöltéseket a mikroszkopikus relaxációs folyamatok határozzák meg a kialakuló állandósult állapotban. Általános szimmetria megfontolásokat nem tudok tenni, de ha az adott pillanatban definiált Hamilton-operátor energia sajátértékei véges gap-pel rendelkeznek minden időpillanatban, akkor ez a tiltott sáv kedvező lehet topológiailag nem-triviális állapotok létrejöttéhez.

7. *"A 7.1-7.2 fejezetekben leírt kutatások motivációjaként elsősorban azt említi, hogy a kísérletekben értelemszerűen nem valósítható meg tisztán sem a kölcsönhatás pillanatszerű bekapcsolása, sem a végtelen hosszú ideig tartó adiabatikus bekapcsolás, mégsem tér ki arra, hogy a tényleges kísérletek hol helyezkednek el a 7.3 ábrán mutatott állapottérben és eredményei mennyiben segítik elő e kísérletek helyes értelmezését. Kérem, foglalja ezt össze röviden."*

Tágabban értelmezve a kísérleteket, beszélhetünk akár numerikus kísérletekről is, pl. a kollégáim által használt DMRG algoritmusról. A 7.2 fejezetben pont egy ilyen numerikus kísérlettel vetem össze a bozonizációval kapott számolásaimat, és meggyőző egyezést találok. Valódi kísérletek esetén a 7.3 ábrán számolt egyrészecske sűrűségmátrixot nem vizsgálták, így elméleti munkáim inkább a nemegyensúlyi folyamatok mélyebb megértésében játszanak szerepet, az állandósult állapot kialakulásakor fellépő idő- és energiaskálák szerepét vizsgálja kölcsönhatás jelenlétében. Mint a fizika több más területén is, az elmélet sok esetben előrébb vagy máshol jár a kísérletekhez viszonyítva, különösen igaz ez a nemegyensúlyi dinamikára. Ezért a kísérletek inkább motivációul szolgálnak a kutatásra, és az elméleti eredmények nem konkrét mérésekre fókuszálnak. Természetesen eredményeim a jelenlegi kísérleti módszerekkel ellenőrizhetőek lennének. Fermionikus vagy bozonikus atomokból Luttinger-folyadék állapot létrehozható (M. A. Cazalilla et al., Rev. Mod. Phys. 83, 1405 (2011)), a kölcsönhatás erőssége a Feshbach-rezonanciák használatával vagy az optikai rács paramétereinek megválasztásával hangolható, végül a momentum eloszlás a time-of-flight méréssel elérhető.

Több ábráról valóban lemaradt a hivatkozás, lehettem volna figyelmesebb.

Budapest, 2015. május 8.

Dóra Balázs